

—普通高等院校—

电 子 信 息 类 系 列 教 材

*KongZhi XiTong*  
*FangZhen*

# 控制系统 仿真

© 冯辉宗 岑明 张开碧 彭向华 编著



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等院校电子信息类系列教材

# 控制系统仿真

冯辉宗 岑 明 张开碧 彭向华 编著

人 民 邮 电 出 版 社  
北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

控制系统仿真 / 冯辉宗等编著. —北京: 人民邮电出版社, 2009. 6

(普通高等院校电子信息类系列教材)

ISBN 978-7-115-20594-0

I. 控… II. 冯… III. 自动控制系统—数字仿真—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第048135号

## 内 容 提 要

全书共 10 章, 主要内容包括系统仿真的基本概念、分类等基本知识; 当前最常用的 MATLAB 仿真软件包及其在控制系统仿真中的应用, 以及 Simulink 的应用、S 函数以及硬件在环仿真系统的开发; 连续系统仿真的基本理论和连续系统模型的离散化方法(包括基本原理、适用范围和程序设计实现, 数字系统及其他特殊的系统仿真方法); 简介离散事件系统的基本概念、建模、仿真方法。

本书每章均安排了习题, 并给出了以 MATLAB 语言编写、可直接运行的所有实例仿真源代码, 便于学生参考和实践。

本书可作为高等学校自动控制、电子工程、通信等电子信息类专业“控制系统仿真”课程的教材, 也可作为工程技术人员的参考用书。

普通高等院校电子信息类系列教材

### 控制系统仿真

◆ 编 著 冯辉宗 岑 明 张开碧 彭向华

责任编辑 张 鑫

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 13.75

字数: 334 千字

2009 年 6 月第 1 版

印数: 1—3 000 册

2009 年 6 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-20594-0/TN

定价: 24.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

系统仿真是研究、设计、分析各种复杂系统的重要工具，广泛应用于国防、军事、能源、交通等工程与非工程领域，特别是近几十年来，随着计算机技术的发展，在各类应用需求的拉动和相关学科技术的推动下，系统仿真技术已经迅速发展成为一门具有通用性、战略性和跨学科的综合技术，并与科学计算一起，成为继理论研究、实验研究之后第 3 种认识和改造客观世界的重要手段。

目前，系统仿真课程已经成为系统工程、自动化等多个学科专业的一门主要课程。当前国内关于系统仿真方面的教材或专著，主要讲述系统仿真的基本原理及理论，或者围绕专门的工具软件如 MATLAB 等以讲述其使用，或者针对特定的领域如国防军事、电力、化工等的仿真应用，并不适合学生的学习。鉴于以上情况，作者在多年从事本课程教学和相关科研的基础上，组织编写一本适合自动化及相关专业本科学生的控制系统仿真教材。考虑到离散事件系统的重要性和广泛应用，将离散事件系统仿真的基础知识也加入其中。

本书共 10 章，分为 4 个部分。第一部分即第 1 章，介绍系统仿真的基本概念、分类以及应用等基本知识。第二部分中第 2~5 章，对当前最常用的 MATLAB 仿真软件包的基本使用做了介绍，包括基本数值运算、符号运算、图形界面控制、控制系统仿真应用等；第 6 章介绍了 Simulink 在控制系统仿真中的应用，包括 Simulink 的基本使用、线性系统工具箱以及利用 S 函数扩展 Simulink 功能，并讲述了 LabVIEW 与 Simulink 的接口，以便利用前者的硬件接口等功能进行硬件在环仿真。第三部分包括第 7~9 章，介绍了连续系统仿真的基本方法，包括数值积分法、时域和频域离散相似法、根匹配法等，并对数字系统及其他特殊的系统仿真方法也做了简单的介绍。第四部分即第 10 章，对离散事件系统的基本概念、建模、仿真方法做了介绍。

本书侧重于系统仿真，尤其是控制系统仿真的基本原理与基本理论及其实现和应用的介绍，为了尽量减少与其他课程或教材内容重复，对可以在其他课程学习的知识如自动控制理论、程序设计基础知识等不做过多讲述。书中吸收了作者在汽车电子控制及仿真开发中积累的一些研究经验和成果，注意理论和实践相结合，所有例子均采用 MATLAB 语言及其基础的函数来实现和验证相关理论方法，以便于读者理解和实践，并方便以图形方式直观表示及与 MATLAB 的专用仿真库函数实现的结果进行比较，同时使代码更加简洁，读者可直接将电子文档中的源代码复制到 MATLAB 集成环境中即可运行。

本书适合作为高等院校自动控制、电子工程、通信等电子信息类专业“控制系统仿真”课程的教材，也可为相关工程技术人员提供参考。读者应学习过自动控制理论相关的前修课程，本书建议学时为 32~48 学时，并配以适当的上机实验或结合相关课程的课程设计以加强对相关知识的理解和实践。

本书第1章由冯辉宗编写，第2~6章由冯辉宗、张开碧编写，第7~9章由冯辉宗、彭向华编写，第10章由岑明编写，全书由冯辉宗统稿。在本书的编写过程中，荣涛、曹更彦、吴建平参与了部分程序的编制和调试，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，本书难免存在错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者  
2009年1月

# 目 录

|                       |    |                      |    |
|-----------------------|----|----------------------|----|
| 第 1 章 系统仿真概述          | 1  | 2.4.4 MATLAB 编程知识和规则 | 20 |
| 1.1 基本概念              | 1  | 2.4.5 MATLAB 程序控制    | 21 |
| 1.1.1 系统的概念和类型        | 1  | 小结                   | 24 |
| 1.1.2 建模和数学模型         | 2  | 习题                   | 24 |
| 1.1.3 系统仿真            | 3  | 第 3 章 MATLAB 的运算     | 25 |
| 1.2 系统仿真              | 4  | 3.1 矩阵操作             | 25 |
| 1.2.1 系统仿真的优点         | 4  | 3.1.1 矩阵构造           | 25 |
| 1.2.2 仿真与数学求解(解析法)的关系 | 5  | 3.1.2 矩阵的访问          | 26 |
| 1.2.3 仿真的分类           | 5  | 3.1.3 矩阵的运算          | 27 |
| 1.2.4 系统仿真的工具         | 7  | 3.2 特殊数组             | 29 |
| 1.2.5 系统仿真的步骤         | 8  | 3.2.1 元胞数组的定义及编址     | 30 |
| 小结                    | 9  | 3.2.2 元胞数组的创建和显示     | 30 |
| 习题                    | 9  | 3.3 基本数学函数           | 31 |
| 第 2 章 MATLAB 基础       | 10 | 3.4 多项式运算            | 32 |
| 2.1 概论                | 10 | 3.4.1 多项式的表示         | 32 |
| 2.1.1 MATLAB 的发展历程和影响 | 10 | 3.4.2 多项式的运算         | 33 |
| 2.1.2 MATLAB 语言的特点    | 11 | 3.4.3 多项式的曲线拟合       | 34 |
| 2.1.3 MATLAB 命令平台     | 11 | 3.4.4 多项式的展开         | 34 |
| 2.1.4 MATLAB 文件系统     | 12 | 3.5 函数插值运算           | 35 |
| 2.1.5 MATLAB 工具箱      | 12 | 3.6 数值求解方法           | 37 |
| 2.1.6 MATLAB 的帮助系统    | 13 | 3.6.1 数值积分           | 37 |
| 2.2 数据类型              | 14 | 3.6.2 数值微分           | 38 |
| 2.2.1 数值类型            | 14 | 3.6.3 微分方程数值求解       | 40 |
| 2.2.2 逻辑类型            | 14 | 3.7 MATLAB 的符号运算     | 41 |
| 2.2.3 字符和字符串          | 14 | 3.7.1 基本符号运算         | 41 |
| 2.3 基本语法结构            | 15 | 3.7.2 符号运算在控制理论中的应用  | 47 |
| 2.3.1 变量与赋值语句         | 15 | 小结                   | 51 |
| 2.3.2 函数语句            | 16 | 习题                   | 52 |
| 2.4 MATLAB 编程基础       | 17 | 第 4 章 MATLAB 绘图      | 53 |
| 2.4.1 MATLAB 命令行操作    | 17 | 4.1 基本绘图功能           | 53 |
| 2.4.2 独立 M 文件         | 18 | 4.1.1 基本绘图函数         | 53 |
| 2.4.3 M 函数            | 19 | 4.1.2 多图绘制           | 55 |
|                       |    | 4.1.3 图形标识           | 58 |

|                            |           |                          |            |
|----------------------------|-----------|--------------------------|------------|
| 4.1.4 坐标轴的控制               | 59        | 6.3 子系统和封装               | 102        |
| 4.1.5 交互式绘图指令              | 59        | 6.3.1 子系统                | 103        |
| 4.1.6 三维绘图                 | 60        | 6.3.2 封装                 | 104        |
| 4.1.7 三维图形的影片动画            | 63        | 6.4 线性系统分析工具             | 105        |
| 4.1.8 其他命令简介               | 63        | 6.5 Simulink 扩展与 S 函数    | 107        |
| 4.2 句柄绘图                   | 65        | 6.5.1 S 函数工作过程           | 107        |
| 4.2.1 基本概念                 | 65        | 6.5.2 S 函数的编写            | 107        |
| 4.2.2 图形对象的创建              | 66        | 6.5.3 S 函数应用             | 110        |
| 4.2.3 对象句柄的获取              | 67        | 6.6 基于 Simulink 和虚拟仪器的   |            |
| 4.2.4 对象属性的获取和设置           | 69        | 硬件在环仿真                   | 116        |
| 小结                         | 73        | 6.6.1 LabVIEW 调用 MATLAB/ |            |
| 习题                         | 73        | Simulink 模型              | 116        |
| <b>第 5 章 MATLAB 控制系统仿真</b> | <b>74</b> | 6.6.2 实时仿真               | 120        |
| 5.1 控制系统分析基础               | 74        | 小结                       | 122        |
| 5.1.1 时域响应绘图               | 74        | 习题                       | 123        |
| 5.1.2 频域响应绘图               | 75        | <b>第 7 章 数值积分法</b>       | <b>124</b> |
| 5.1.3 根轨迹图                 | 77        | 7.1 连续系统仿真特点和方法          | 124        |
| 5.1.4 离散系统仿真               | 78        | 7.2 欧拉法                  | 125        |
| 5.2 系统数学模型及转换              | 80        | 7.2.1 基本欧拉法              | 125        |
| 5.2.1 数学模型                 | 80        | 7.2.2 改进的欧拉法             | 126        |
| 5.2.2 模型转化                 | 81        | 7.3 龙格库塔法                | 131        |
| 5.3 控制系统分析设计               | 85        | 7.3.1 龙格库塔法基本原理          | 132        |
| 5.4 系统校正                   | 89        | 7.3.2 常用的龙格库塔公式          | 132        |
| 5.4.1 PID 校正               | 89        | 7.3.3 微分方程组的解            | 134        |
| 5.4.2 根轨迹校正                | 90        | 7.4 数值积分法的误差估计和          |            |
| 5.4.3 频率法校正                | 91        | 稳定性                      | 136        |
| 小结                         | 92        | 7.4.1 误差估计和步长控制          | 136        |
| 习题                         | 92        | 7.4.2 变步长龙格库塔法           | 137        |
| <b>第 6 章 Simulink 仿真</b>   | <b>94</b> | 7.4.3 数值积分法的稳定性          | 139        |
| 6.1 Simulink 的基本操作         | 94        | 7.5 亚当姆斯法                | 141        |
| 6.1.1 新建模型(后缀为.mdl)        | 94        | 7.5.1 亚当姆斯显式公式           | 141        |
| 6.1.2 进入 Simulink 模块库      |           | 7.5.2 亚当姆斯隐式公式           | 142        |
| 浏览器                        | 94        | 7.5.3 预估校正公式及亚当姆斯法的      |            |
| 6.1.3 常用的基本模块              | 95        | 稳定区                      | 143        |
| 6.1.4 模块的操作                | 97        | 小结                       | 144        |
| 6.2 系统仿真及参数设置              | 99        | 习题                       | 144        |
| 6.2.1 算法设置                 | 99        | <b>第 8 章 快速数字仿真方法</b>    | <b>145</b> |
| 6.2.2 工作空间设置               | 100       | 8.1 时域离散相似法              | 145        |
| 6.2.3 应用举例                 | 102       | 8.1.1 转移矩阵法              | 145        |

|                           |            |                             |            |
|---------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| 8.1.2 增广矩阵法.....          | 147        | 10.1.2 库存系统.....            | 178        |
| 8.2 状态转移矩阵的计算.....        | 148        | 10.2 随机变量模型的确定和变量的产生.....   | 179        |
| 8.2.1 泰勒级数展开法.....        | 148        | 10.2.1 模型的确定.....           | 179        |
| 8.2.2 加速收敛法——缩方与乘方法.....  | 151        | 10.2.2 随机变量的产生.....         | 181        |
| 8.3 状态方程的求取.....          | 151        | 10.3 离散事件系统建模与仿真概述.....     | 186        |
| 8.4 频域仿真方法.....           | 155        | 10.3.1 基本建模术语.....          | 187        |
| 8.4.1 替换法.....            | 155        | 10.3.2 典型仿真方法.....          | 189        |
| 8.4.2 根匹配法.....           | 157        | 10.4 实体流图法及其仿真.....         | 190        |
| 8.5 频域离散相似法.....          | 159        | 10.4.1 实体流图建模.....          | 190        |
| 8.5.1 信号的采样.....          | 160        | 10.4.2 实体流图模型的人工运行.....     | 192        |
| 8.5.2 信号的复现与保持器.....      | 160        | 10.4.3 实体流图模型的事件调度法仿真.....  | 193        |
| 8.5.3 滞后环节和非线性环节.....     | 163        | 10.5 活动周期图法及其仿真.....        | 197        |
| 8.5.4 离散相似法计算方法.....      | 164        | 10.5.1 活动周期图法建模.....        | 198        |
| 8.5.5 信号补偿问题.....         | 168        | 10.5.2 活动周期图模型的人工运行.....    | 200        |
| 小结.....                   | 169        | 10.5.3 活动周期图模型的活动扫描法仿真..... | 201        |
| 习题.....                   | 169        | 10.6 进程交互仿真方法.....          | 204        |
| <b>第9章 其他系统的仿真.....</b>   | <b>170</b> | 10.7 Petri 网方法简介.....       | 207        |
| 9.1 采样控制系统的仿真.....        | 170        | 10.7.1 主要的基本术语.....         | 207        |
| 9.2 病态系统仿真简介.....         | 172        | 10.7.2 Petri 网的数学结构.....    | 208        |
| 9.3 间断特性的仿真.....          | 173        | 10.7.3 网系统.....             | 209        |
| 9.4 分布参数系统仿真.....         | 174        | 小结.....                     | 210        |
| 小结.....                   | 174        | 习题.....                     | 211        |
| 习题.....                   | 175        | <b>参考文献.....</b>            | <b>212</b> |
| <b>第10章 离散事件系统仿真.....</b> | <b>176</b> |                             |            |
| 10.1 离散事件系统的分类.....       | 176        |                             |            |
| 10.1.1 排队系统简介.....        | 177        |                             |            |

系统仿真技术是近几十年来发展的一门综合性技术学科,它以相似性原理、控制理论、计算技术、信息技术以及各应用领域的专门知识为基础,不仅大量应用在如机械、电子、航空航天、电力、化工等工程领域,还越来越广泛地应用在如社会经济、生态环境、教育训练等非工程领域,并已取得极大的经济效益。系统仿真技术已成为设计、分析、研究系统尤其是复杂系统的重要手段,并被认为是继理论研究、实验研究之后第3种认识和改造客观世界的重要手段。

## 1.1 基本概念

仿真通过建立系统的数学和仿真模型,并利用计算机进行仿真以研究、分析系统,所以系统仿真包含了系统、模型和仿真3个方面,其中系统是研究对象,模型是系统的抽象,仿真是通过对模型的实验而达到研究系统的目的。

### 1.1.1 系统的概念和类型

系统(system)是指具有某些特定功能,按照某些规律结合起来,互相作用、互相依存的所有物体的集合或总和,如生态系统、控制系统等。任何系统都存在3方面需要研究的内容,即实体、属性和活动(事件)。存在于系统中的每一项确定的物体称为实体,实体所具有的每一项有效的特征就是实体的属性;活动是系统状态发生变化的一个过程。为了限制所研究问题涉及的范围,一般用系统边界把被研究的系统与系统外部区分开来,影响系统而又不受该系统直接控制的全部外界因素的集合称为系统环境。

系统有很多分类方法,如按系统的物理特征可分为工程系统和非工程系统。其中工程系统即人造系统,如电气、机械、化工、声学、热学等系统;非工程系统又称自然系统,如社会、经济、交通、管理、生态系统等。一般来说,自然系统更加复杂,采用的仿真方法更特殊。从研究方法的角度,更多的是按状态变化规律来分类,这种分法决定了系统的数学模型和仿真的基本方法,是一种最常用的系统分类法。按系统状态变化时间是否连续一般可将系统分成两大类(其中两者交叉为混合系统),如下所述。

① 连续系统:状态变量是连续变化的,系统的时间参数也是连续的,自然系统和大多数人造系统都是连续系统,这包括集中参数系统(如动力学系统和生态系统)和分布参数系统

(如物理和工程领域中场的问题)。

② 离散系统：包括离散时间系统（如采样控制系统、数字系统）和离散事件系统（如社会、经济、军事运筹和有限资源竞争问题）。

③ 混合系统：是由连续系统和离散事件系统组成的，如含指挥决策的多武器作战系统。

图 1.1 所示有 4 种系统，其中图 1.1 (a) 表示一天内气温随时间变化的关系，其中时间是连续的，温度在该变化范围内也是连续的，这种系统属于连续系统。当人要使用温度计或者其他普通仪表来观察记录气温时，可能要间隔一定时间记录一次，如每 10 分钟、每小时一次等，这就是采样系统，如图 1.1 (b) 所示。如果采用数字仪表来进行采样，由于数字处理器的串行处理特点和处理精度问题，系统不仅在时间上是离散的，而且在状态取值上也经过量化，这类系统称为数字系统，如图 1.1 (c) 所示。前三类系统表面差别很大，但具有共性，即系统一般都可以由确定的数学模型来表达，如代数方程、微分方程、差分方程等。虽然采样数据系统一类的离散时间系统的变量是间断的，但是它和连续系统具有相似的性能，它们的模型都能用方程的形式加以描述，且随着计算机的速度和精度的提高，其差别越来越小，有时把它们都称作连续系统。离散时间系统、集中参数系统和分布参数系统的系统研究的方法是控制论。

对于如图 1.1 (d) 所示的系统，状态变量的取值可以是连续的也可以是离散的状态，状态的改变时刻具有随机性，称为离散事件系统。离散事件系统一般带有随机性，即事件的发生不是确定性的，而是遵循某种概率分布，它的模型不能用方程的形式描述，离散事件系统的研究方法是排队论和运筹论等，所以有时根据状态变化和研究解决方法将系统分为连续系统和离散事件系统两大类，即连续、离散时间系统和离散事件系统。

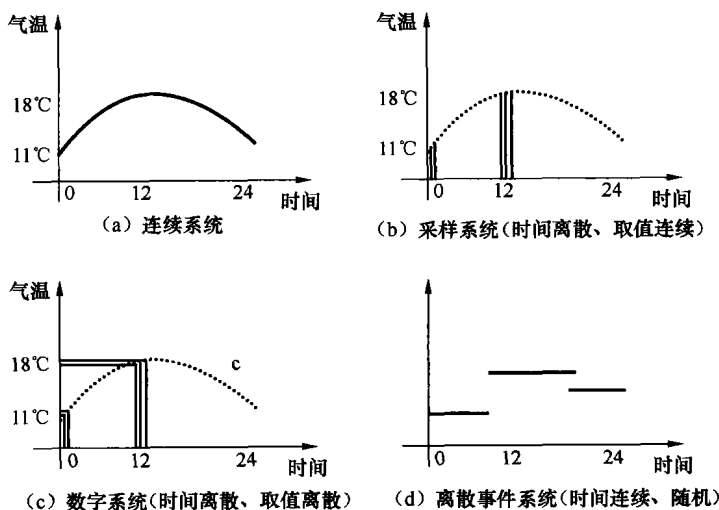


图 1.1 系统模型分类

### 1.1.2 建模和数学模型

系统模型 (system model) 是对实际系统的一种抽象，是系统本质的表述，是人们对客观世界反复认识、分析，经过多级转换、整合等相似过程而形成的最终结果。系统模型具有与系统相似的数学描述或物理属性，以各种有用的形式，给出研究系统的信息。正确建立的

模型，能更深刻、更集中地反映实体的主要特征和运动规律，从而达到对实体的抽象。从这一点来说，模型更优于实体。系统模型主要包括实体模型和数学模型。

(1) 实体模型：又称物理效应模型，是根据系统之间的相似性而建立起来的物理模型。实体模型包括静态模型和动态模型。静态的实体模型最常见的是比例模型，如军事和建筑上的沙盘、模型玩具等。动态实体模型的种类更多，如电力系统动态模拟试验中，可利用小容量的同步机、感应电动机与直流机等组成系统，作为电力网的实体模型来研究实际电力系统的各项性能。

(2) 数学模型：包括原始系统数学模型和仿真系统数学模型。原始系统数学模型又包括概念模型和正规模型，概念模型是用说明文字、框图、流程和资料等形式对原始系统的描述，正规模型是用符号和数学方程式来表示系统的模型，其中系统的属性用变量表示，系统的活动则用相互有关的变量之间的数学函数关系式来表示。原始系统数学建模过程被称为一次建模。仿真系统数学模型是一种适合在计算机上进行运算和试验的模型，主要根据计算机运算特点、仿真方式、计算方法、精度要求，将原始系统数学模型转换为计算机的程序。仿真试验是对模型的运转，根据试验结果情况，进一步修正系统模型。仿真系统数学建模过程被称为二次建模。一般将原始系统数学模型和仿真系统数学模型分别简称为数学模型和仿真模型。

相对而言，物理效应模型的造价昂贵且耗时长，而数学模型的产生和应用则更为方便和经济，因此，系统仿真中更多的是使用数学模型。不同的数学模型及描述方法对照如表 1.1 所示。

表 1.1 数学模型分类

| 模型分类 | 静态系统模型 | 动态系统模型               |       |                    |                        |
|------|--------|----------------------|-------|--------------------|------------------------|
|      |        | 连续系统模型               |       |                    | 离散事件系统                 |
|      |        | 集中参数                 | 分布参数  | 时间离散               |                        |
| 数学描述 | 代数方程   | 微分方程<br>传递函数<br>状态方程 | 偏微分方程 | 差分方程、脉冲传递函数、离散状态方程 | 概率分布、排队论               |
| 应用举例 | 稳态解    | 工程动力学<br>系统动力学       | 热传导场  | 计算机采样控制系统          | 交通系统、市场系统、电话系统、计算机分时系统 |

1.1.3 系统仿真

系统仿真（system simulation）是以相似原理、系统论、信息技术及其应用领域有关专业技术为基础，以计算机和各种专用物理效应设备为工具，利用系统模型对真实的或设想的系统进行动态研究的一门多学科的综合性的技术；通过研究模型来揭示原型（实际系统）的形态特征和本质，从而达到认识实际系统的目的。由于现在的仿真都是利用计算机进行的，所以通常又称为计算机仿真。

1946 年电子微分分析器的诞生，开创了系统仿真的新纪元，系统仿真逐渐成为以相似论、系统科学、计算机科学、系统工程理论、概率论、数理统计和时间序列分析等多个学科理论为基础的新兴的综合性学科。其中相似论是系统仿真的主要理论依据。系统仿真一般利用以下相似性。

(1) 几何相似。结构尺寸按比例缩小得到的模型,称为缩比模型,如在风洞或水洞试验里用这种模型进行空气动力学、流体力学的研究。

(2) 物理相似。指物理原理、过程、效应及环境条件等的相似,如仿真电力系统运行建立较小的模拟系统进行研究等,用火药爆炸产生天文、地质演变中的一些高温、高压条件等。

(3) 离散相似。采用差分法、离散相似法等把连续时间系统离散化为等价的离散时间系统以进行数字仿真或控制实现。

(4) 等效性。保证数学描述相同或者频率特性相同、相似,用于构造数字仿真器的相似原则,如连续系统快速仿真中的替换法等。

(5) 感觉相似。感觉相似涉及耳、眼、鼻、舌、身等感官和经验,人在回路中的仿真把感觉相似转化为感觉信息源相似,例如培训仿真器和虚拟现实均是利用了这种相似原则。

(6) 思维相似。包括逻辑思维相似和形象思维相似,用数理逻辑表示知识,建立知识的逻辑符号系统,对符号公式进行判断和推理。如早期专家系统的基于逻辑的心理模型,人工神经网络是以脑神经为原型所构造的简化模型,用来实现对刺激的适应性反应。

## 1.2 系统仿真

### 1.2.1 系统仿真的优点

随着科学技术和社会生产的快速发展,人类研究的系统对象越来越复杂、庞大、精密,其复杂程度早已超出了个人的经验范围和控制能力,涉及的代价和风险也越来越高昂,如核电站运行、城市规划、交通系统调度、海洋和大气的运行规律、战略防御系统、飞行器的开发和运行等。仿真技术的应用可以用较小的投资换取风险的大幅度降低,如武器靶场系统设计,减少实验次数、时间、成本 30%~40%。协和式飞机节省成本 20%。采用现代仿真技术具有以下优点。

① 可预料性:在复杂的系统建立以前或实际外部条件无法得到的情况下,能够通过改变仿真模型结构和调整参数来优化系统设计。

② 全面性:对系统或系统的全局或某一部分进行不同环境和条件下的分析,如性能评价,抗干扰性能的分析等。

③ 经济性:仿真试验只需在可重复使用的模型上进行,建立模型尤其是数学模型的代价比建立实际系统小得多,所花费的成本比在实际产品上做试验低。

④ 可重复再现性:如重现外界条件、系统状态和故障,以便判断故障产生的原因等。在实际系统中外界环境和各种状态难以达到或者出现的几率小,难以把握控制。

⑤ 安全性:可以避免试验的危险性,如飞行模拟、核爆炸等。

⑥ 可用于分析,设计创建和改进系统,训练系统操作人员,统计预测,为管理决策和技术决策提供依据。

正因为如此,仿真技术是一个非常重要的学科领域,在科学研究、社会生产中起到重要的作用并日益受到重视。总体来说,仿真的发展大致经历了以下阶段。

1600~1940 年,物理科学的仿真(手段和应用领域)。

20 世纪 40~50 年代,计算机出现,并应用于航空领域的仿真。

20 世纪 50~60 年代, 开始应用于工业过程控制。

20 世纪 60~70 年代, 经济、军事、社会、环境等大系统的仿真。

20 世纪 70~90 年代, 系统仿真与决策支持、集成化建模、仿真系统出现。

20 世纪 90 年代至今, 在线仿真、实时仿真、仿真建模方法学、可视化建模与仿真、人工智能、虚拟现实、分布式交互式仿真等日益成熟并在各领域得到广泛的应用。

如美国国家关键技术委员会于 1991 年确定仿真技术为影响美国国家安全及繁荣的 22 项关键技术之一。在推动仿真技术发展的主要动力之一军事领域, 美国在武器系统仿真技术方面具有先进的水平, 研制出系列化飞行仿真器和阵列式目标仿真器, 利用万亿次/秒的高速数字机用于核武器的仿真研究, 并将仿真技术用于战争的预先推演。我国仿真技术的研究与应用发展迅速, 自 20 世纪 50 年代开始, 在军事、交通、企业管理方面逐渐应用。当前, 有人提出当今的六大难题——核反应过程、宇宙起源、生物工程、结构材料、社会经济和战争需要应用仿真技术来解决。

### 1.2.2 仿真与数学求解(解析法)的关系

(1) 数学求解是通解, 仿真是特解, 是具体条件下的一个解集, 换句话说, 在通常情况下, 如果系统具有准确的数学模型和解析解, 则没有必要进行仿真。

(2) 数学求解是有限的, 需要简化和抽象。现实中的绝大多数系统都没有完全准确的数学模型和解, 很多模型都是在特定条件下并进行简化后得到的, 并不能代表系统所有条件下的情况, 如对非线性系统进行分段线性化而得到线性系统等。即使有准确的数学模型, 大多数系统也因为数学模型过于复杂而求解析解困难甚至无法求得。而仿真原则上对数学模型的复杂程度没有限制, 有时可能是唯一的解决方法。

(3) 数学求解是一次性的, 重在结果; 仿真是一种实验方法, 重在不同条件下多次运行的过程和一系列结果的分析。

### 1.2.3 仿真的分类

#### 1. 根据仿真计算机类型来分

可分为模拟计算机仿真、数字计算机仿真及混合仿真。模拟计算机由运算放大器等构成的模拟电路系统组成, 输入、输出都是模拟量, 具有并行性、系统复杂程度对快速性影响小、本身是模拟信号所以易于和实物相连实现实时仿真等优点, 对一些特殊环节如积分等实现非常方便; 缺点是精度低, 逻辑功能差, 有些功能如纯滞后等无法实现。数字计算机仿真精度高、成本低且应用广泛, 但具有串行执行的延迟性, 需要对连续模型离散化并编制相应的算法, 与实物连接需要转换等。混合仿真是利用模拟计算机、数字计算机共同进行仿真。目前一般为数字仿真。

#### 2. 按系统动态模型的时间标尺和实际系统的时间标尺来分

可分为实时仿真和非实时仿真。计算机在仿真时涉及两个时间概念: 仿真时间、实际时间。仿真时间指仿真算法开始后一个循环所需要的时间, 包括程序执行、必要的输入输出等时间; 实际时间指算法一个循环所代表系统实际的时间推进长度, 又称仿真步

长。如用数字仿真方法仿真宇宙的演变,程序运行一个周期或循环需要1分钟,这就是仿真时间,而可能这1分钟代表1亿年时间宇宙的变化。根据两个时间标尺的关系可分为如下几种。

(1) 实时仿真。仿真时钟与实际时钟是完全一致的,仿真时间受实际时钟控制,一般有实物系统介入的仿真都是实时仿真。对实时算法要求不仅有计算结果正确与否,而且必须还要在正确的时间得到结果,所以实时仿真实现通常要采用合适的时钟产生和程序控制方法,如外部时钟、实时任务调度管理或硬件中断、同步及通信、错误捕捉和处理等各种手段,在仿真策略上,考虑到实现问题一般采用定步长法。

(2) 欠(亚)实时仿真。仿真时钟比实际时钟慢,如仿真核爆炸过程、电机运转。

(3) 超实时仿真。仿真时钟比实际时钟快,如金属的腐蚀、气象变化、生物进化仿真等。

后两者又称非实时仿真,实际上多采用变步长法以提高精度和效率。

### 3. 根据系统仿真结构和实现手段来分

(1) 物理仿真。又称物理效应仿真,指的是研制某些硬件结构(实体模型),使之可重现系统的各种状态,而不必采用昂贵的原型,仿真直观形象,但构建模型费用高,周期长,修改调整结构和参数困难,受环境限制,易受干扰。

(2) 数学仿真。是利用相似原理,按照实际系统的数学关系构建数学模型,实际系统全部由数学模型代替,并把数学模型变成仿真模型,在计算机上对实际系统进行研究的过程。早期的仿真由于受到数学工具尤其是解析方法、手段的限制,如时域解微分方程等的困难,所以大多是采用物理仿真。在数值求解方法、自动控制理论、计算机等发展到一定程度,采用计算机进行数学或数字仿真成为系统仿真的主流,目前只有构建物理仿真系统非常简单容易或者系统的物理、数学规律尚没有完全掌握的复杂系统才使用物理仿真。

(3) 半实物仿真。在某些系统研究中,常把数学模型、实体模型(物理效应模型)或系统的实际设备(实物)联系在一起运转,组成仿真系统。这种仿真集合了数字仿真和物理仿真的优点,具有重要的意义,许多高可靠性要求的系统设计如飞行器等开发一般都要经过半实物仿真这个阶段。由于半实物仿真和实际的物理系统或模型相连,不仅在输入、输出信号转换上要解决,更重要的是数字系统(主要用计算机来实现)必须进行实时的运算和输入输出,因而使系统的设计和实现更具有挑战性。

对于控制系统,通常分为控制器、执行器、被控对象及传感器几个部分,其中控制器主要采用基于单片机、工控机等数字控制器,对控制系统的仿真主要包括两部分,即控制器的仿真和被控对象的仿真,传感器、执行器通常合并到这两者之一里。在建模和数字仿真阶段,可以对整个系统(也可分别对控制部分和对象)进行建模和仿真分析,但决定控制正确性和效果的因素很多,如仿真模型的精确性、实际环境的干扰、输入输出信号特征和通道等,更重要的是各种信号、任务、决策等的时效问题,采用半实物仿真可分别针对控制器、被控对象进行研究。

针对被控对象(通常可包括执行器和传感器)建立仿真模型,在数字仿真阶段验证后,通过定义系统硬件相关特性,如与通信、输入输出、定时中断等驱动系统结合,可以将仿

真软件下载到基于具有实时功能的工业控制计算机、单片机嵌入式系统等硬件仿真器里运行，硬件仿真器接收控制信号，经过仿真计算后实时反馈执行结果也即被控对象的状态信息给控制器，控制器不能区分和它连接的是真实的被控对象还是仿真器，这种仿真一般称为硬件在回路仿真或硬件在环仿真（Hardware In the loop Simulation, HILS）。同样，经过数字仿真的控制算法，也可以通过上述流程下载到特定的硬件中，实现实时地控制仿真。由于通常控制器的输入输出等关系比较复杂，通常设计一些具有一定通用性的硬件来实现，为了将设计者采用建模工具建立的以信号图等形式表示的控制逻辑、算法转化为可运行于特定硬件的软件并能及时修改参数和监控仿真过程，很多一体化建模仿真系统提供相关的软硬件条件来支持，并将这一流程称为快速控制原型（Rapid Controller Prototyping, RCP）设计。因此，实际控制器、硬件仿真的控制器、数字仿真控制模块、实际被控对象、硬件仿真的被控对象、被控对象的数字仿真模块等几个方面和部分可以相互组合构成实际或仿真的控制系统，从而实现对控制算法、仿真算法及整个系统进行研究设计，如图 1.2 所示。

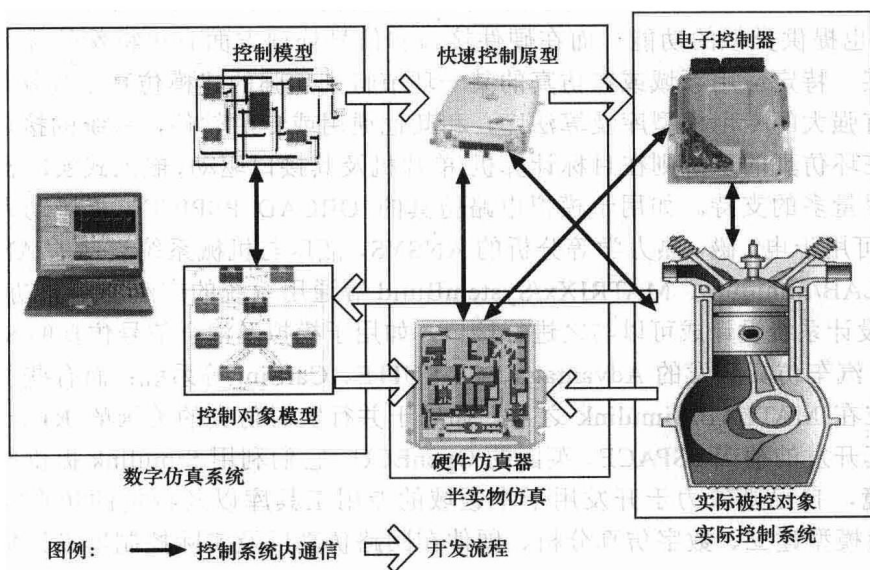


图 1.2 仿真的不同形式

(4) 人在回路中仿真。人在回路中的仿真系统，要着重解决人的感觉环境的仿真生成技术，包括视觉、听觉、动感、力反馈等仿真环境。

(5) 软件在回路中仿真。这里所指的软件是实物上的专用软件，例如，武器系统中的战术决策、信息处理控制软件。这类仿真又称为嵌入式仿真。

#### 1.2.4 系统仿真的工具

仿真及软件的设计与开发主要基于以下几类软件工具。

(1) 通用程序设计语言（FORTRAN、Basic、C、C++）。由于这些语言或编程工具不是专为系统仿真设计，开发人员花费大量精力在程序设计语法、基本的运算如矩阵的求逆等基本问题上，效率很低，难以推广。

(2) 仿真软件包。采用通用的计算语言编制, 功能较简单, 容易建立完成一项功能, 解决专门问题的程序叫软件包, 仿真研究人员将他们编制的计算仿真程序以子程序库的形式集中起来并可以较灵活地调用, 但仍具有一定的专用、不便等特点, 如 SIMLIB、CASP 和 GSP 等, 国内在机械、控制、电子设计等领域也有大量的这样专用的软件包。

(3) 仿真语言。仿真语言多属面向对象的高级语言, 它是在通用高级语言的基础上, 针对专门问题研制的, 分为面向方程和面向框图两种类型的仿真语言, 它不要求用户掌握复杂的高级语言, 而由机器自动翻译成高级语言或汇编语言, 所以速度较慢, 而且研制周期较长, 但它面向用户, 具有较强的仿真功能, 如 IBM 的 CSMP、美国的 ACSL 和与之类似的瑞典的 SIMNON、英国的 ESL 等。

(4) 一体化建模与仿真环境。通常涵盖建模、软硬件仿真、结果分析处理以及最终的控制器的开发和测试等各个环节。这类开发系统可分为两类, 一类是通用的建模仿真工具, 如 MATLAB 以及其所带的图形化建模仿真软件 Simulink 是当前最有影响力的工具软件; 美国 Integrated Systems 设计开发的 MATRIXx 和其图形化的建模与仿真的环境 SystemBuild 是和 MATLAB/Simulink 类似的通用建模与仿真系统; 美国国家仪器公司的 LabVIEW 也提供类似的功能, 而在硬件接口和信号处理方面有更特殊的优势。第二类是专注于某一特定应用领域或在仿真的某一环节特别加强的建模仿真工具软件, 这些软件系统具有强大的专用模型库及算法库, 和其他通用或专用软件, 系统的接口方便, 专注于硬件在环仿真的系统则在目标计算机/单片机及其接口驱动、嵌入式实时操作系统等方面提供尽量多的支持。如用于模拟电路仿真的 ORCAD PSPICE, 机械动力学分析的 ADAMS, 可用于电、磁、热力学等分析的 ANSYS, 液压与机械系统设计的 AMESim 等。鉴于 MATLAB/Simulink、MATRIXx/SystemBuild 等通用系统的广泛使用和功能的强大, 不少仿真/设计系统设计成可以与之进行接口, 如用于模拟及混合信号仿真的 Saber 软件, 用于航空、汽车仿真开发的 Advantage、GT-SUITE、CarSim 等系统; 而有些仿真工具则是直接建立在 MATLAB/Simulink 之上, 如用于并行实时仿真的美国的 RT-lab、汽车电子控制仿真开发的德国 dSPACE、英国的 OpenECU, 它们利用 Simulink 提供的建模和仿真计算环境, 自己则致力于开发用于本领域的专用工具库以及特定的仿真控制硬件环境, 从而为模型建立、数字仿真分析、硬件在回路仿真以及实际控制器设计提供强大的支持。

### 1.2.5 系统仿真的步骤

数字仿真的三项基本要素是系统、模型和计算机。联系三项要素的三项基本活动是系统建模、仿真建模和仿真试验。数字仿真通过建立系统数学模型并针对数字计算机转化为仿真模型, 最后在计算机上仿真运行。建模和仿真是一个不断反复修正完善的过程, 即使模型和算法正确, 也要通过不断修改仿真参数或系统内外部环境条件来查看各种情况下系统的运行效果以研究系统的性能。其过程如图 1.3 所示。

本书首先介绍当前最常用的仿真工具 MATLAB 以及 Simulink 及其在控制系统仿真中的应用, 然后介绍了连续系统仿真的常用方法, 最后介绍了离散事件系统建模仿真的一般方法。为了使读者注意力集中在仿真方法本身上, 减少因计算机程序语言基础造成的困难以及算法特别是绘图实现的方便, 本书大多采用 MATLAB 语言来编写程序。

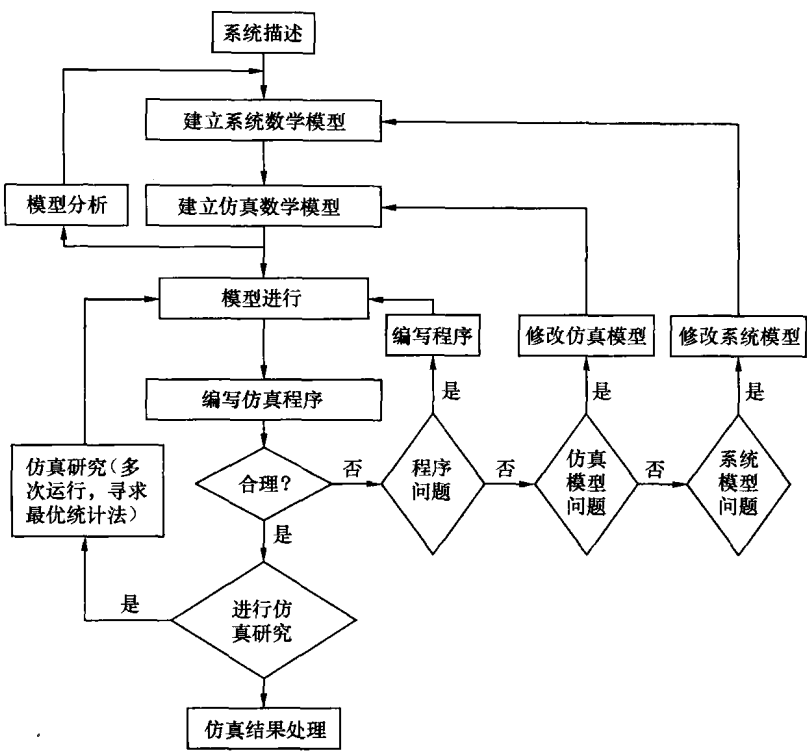


图 1.3 建模仿真过程

## 小 结

系统仿真包括通过系统建模建立系统模型、仿真建模建立可运行于计算机上的仿真模型以及仿真试验 3 个基本活动。本章主要讲述了系统、模型、仿真等系统仿真领域的相关基本概念、分类等基础知识；针对不同性质的系统和不同的要求应采取不同的建模、仿真方法及工具；对仿真技术的发展历史、趋势以及当前常用的仿真开发工具作了简单的介绍。

## 习 题

1. 请各举 3 个现实中连续系统和离散系统的例子。
2. 按时间标尺分，如下系统仿真通常分别属于哪种仿真。

|               |           |
|---------------|-----------|
| A. 炸弹的爆炸      | B. 恒星的演变  |
| C. 驾驶游戏里赛车的仿真 | D. 层积岩的形成 |
3. 查阅资料，了解你所在的学科、专业常用的商用仿真分析软件工具，并说出其功能、组成、运行环境等相关信息。